# Sensordatenerhebung Komfortbezogener Einflüsse auf den Radverkehr

Lars Badde[1], Waldemar Titov[2], Thomas Schlegel[2]

**Abstract:** Ziel dieser wissenschaftlichen Arbeit ist es eine objektive Datengrundlage zum Komfort von Fahrradwegen zu schaffen. In nachstehenden Untersuchungen sollen anhand dieser Daten präzise Rückschlüsse zum Komfort auf Teilstrecken gezogen werden können und dem Nutzer individualisiert verfügbar gemacht werden. Zu diesem Zwecke wird zunächst betrachtet welche Faktoren den Komfort von Fahrradstrecken, sowohl positiv als auch negativ, beeinflussen. Anschließend soll ermittelt werden, wie diese Faktoren mit Hilfe einer Sensorapparatur automatisiert erfasst werden können. Aufbau und Programmierung des Sensormoduls, sowie die Konsistenz der erhobenen Daten werden auf Basis eines Feldtestes evaluiert, um deren Tauglichkeit für die Schaffung eines solchen „Fahrrad-Informations-Systems“ zu gewährleisten.

**Keywords:** Sensorik; Fahrrad; Komfort; Datenerhebung; Tinkerforge

## 1 Einführung

Im Rahmen mehrerer zusammengehöriger Untersuchungen sollen Wege gefunden werden, Daten bezüglich des Komforts von Fahrradteilstrecken zu erheben, auszuwerten und darzustellen. Ohne Ortskenntnis ist es für einen Radfahrer schwierig einen komfortablen Fahrradweg zu erkennen. Mit Hilfe von Tools wie GoogleMaps lassen sich oft nur die schnellsten Wege finden. Ob diese Wege auch den erwarteten Komfort für einen Fahrradfahrer bieten ist jedoch nicht zu erkennen. Will der Radfahrer nicht auf engen Straßenräumen mit hohem Kfz-Verkehr fahren, oder signalisierte Kreuzungen meiden, so werden spezielle Informationen zu den jeweiligen Teilstrecken benötigt.

Die bestehenden Informationsmöglichkeiten beschränken sich bisher auf spezielle Radfahrkarten, –Bücher oder besondere Apps. Während Printmedien prinzipiell nur subjektive Fremdmeinungen wiedergeben, die oft nicht aktuell sind und nicht die Möglichkeit bieten individuelle Vorlieben zu berücksichtigen, sind Systeme die auf Massendatenerhebungen basieren, bis auf GoogleMaps, nicht vorhanden.

Ziel dieser Untersuchung ist es Faktoren auszumachen, die den Komfort für Fahrradfahrer beeinträchtigen. Mit der Entwicklung eines Sensormodules sollen dann automatisiert Daten

[1] Karlsruhe University of Applied Sciences, Moltkestraße 30, 76133 Karlsruhe, Germany, larsbadde@web.de | https://www.hs-karlsruhe.de/
[2] Institute of Ubiquitous Mobility Systems (IUMS), Karlsruhe University of Applied Sciences, Moltkestraße 30, 76133 Karlsruhe, Germany, iums@hs-karlsruhe.de | http://iums.eu

doi:10.18420/inf2020_105

erfasst werden, die diese Faktoren bemessen und lokalisieren. Auf diese Weise können schnell und effizient massenweise Daten gesammelt werden. In weiteren, nachstehenden Untersuchungen sollen auf Basis dieser Daten Rückschlüsse über den Komfort von Fahrradteilstrecken getroffen werden können und diese mit Hilfe von Mapping-Systemen für den Nutzer verfügbar zu machen.

Das primäre Ziel ist die konsistente, automatisierte Erfassung von Sensordaten, im Hinblick auf deren Aussage zum Komfort von Fahrradteilstrecken. Zu diesem Zweck muss zunächst herausgestellt werden, welche Faktoren einen Fahrradfahrer behindern, stören oder eventuell anreizen können. Anschließend soll untersucht werden in wie fern diese Faktoren durch Sensoren bemessen werden können. Daraufhin kann dann das Sensormodul selbst entwickelt, getestet und evaluiert werden. Die Daten werden mit Hinblick auf Ihre Konsistenz und Aussagekraft betrachtet, um die Tauglichkeit des Sensormoduls bewerten zu können.

## 2 Themenbezogene Arbeiten

Der Bundesverkehrswegeplan 2030 [IS16] setzt als eines seiner Hauptziele die Verlagerung des Verkehres auf umweltverträglichere Verkehrsträger an. Als „übergeordnete Ziele“ werden unter anderem die Erhöhung der Verkehrssicherheit, sowie die Verbesserung der Lebensqualität einschließlich der Lärmsituation in Regionen und Städten genannt. Im Sinne dessen ist die Förderung des Radverkehrs von gesonderter Bedeutung. Um den Radverkehr zu fördern können sich Länder, Städte und Kommunen zahlreicher Maßnahmen bedienen. Grundsätzlich sind diese Maßnahmen zur Verkehrsträgerverlagerung unterschieden nach „harten“ und „weichen“ Maßnahmen [Sc09]. Harte Maßnahmen stellen Infrastrukturmaßnahmen, wie beispielsweise Straßenaus- oder Neubau dar. Diese sind folglich oft mit hohen Investitionskosten verbunden. Weiche Maßnahmen bestehen aus Information, Kommunikation, Motivation, Koordination und Service [SE14]. Diese weichen Maßnahmen gewinnen im “Informations-Zeitalter“ immer mehr an Bedeutung [Gö11]. Insofern kann ein merkbarer Effekt des forcierten Fahrrad-Informations-Systems auf den Radverkehrsanteil erwartet werden. Des Weiteren können die erhobenen Daten auch als Datengrundlage zu weiterführenden verkehrsplanerischen Analysen genutzt werden. [TS19] verfolgt einen crowdsensing Ansatz. Dabei erfolgt die Datenerfassung mittels einer App auf dem Smartphone welches für die Aufzeichnung starr am Fahrradlenker befestigt wird. Während der Aufzeichnung werden Werte der vier Sensoren (Standort, Rotationsgeschwindigkeit Beschleunigung und lineare Beschleunigung) aufgezeichnet und zur Klassifikation auf einen Server hochgeladen. Mit Hilfe eines maschinell lernenden Algorithmus erfolgt die beschriebene Klassifizierung der Daten in drei Qualitätsstufen.

### 2.1 Komfortfaktoren im Radverkehr

Um den Komfort eines Fahrradstreckenabschnittes bewerten zu können, muss zunächst ermittelt werden, welche Faktoren diesen beeinflussen und ob, beziehungsweise auf welche Weise, diese durch Sensorik erfasst werden können.

Bisherige Studien haben sich im Zusammenhang von Komfort und Radverkehr vor allem mit Wetterbedingungen und Jahreszeiten befasst [BFG84]. Diese eher zeitlichen Einflussfaktoren sollen nicht im Fokus dieser Untersuchung stehen. Es sollen stattdessen räumlich differenzierte Einflussfaktoren betrachtet werden. Eine Studie aus dem Jahre 2008 bezifferte den Einfluss „lokaler Faktoren“ auf den Radverkehrsanteil auf etwa 70% [TJT08].

Laut dem Allgemeinen Deutschen Fahrrad-Club e.V., kurz ADFC haben Studien gezeigt, dass der Großteil der Menschen, häufiger das Fahrrad benutzen würde, wenn sie den Radverkehr positiver erleben würden [DV14]. Wenn also der Straßenraum und Streckenführung mehr auf den Fahrradfahrer angepasst sind. Die ERA (Empfehlungen für Radverkehrsanlangen) empfiehlt, neben der Ermöglichung von schnellen und direkten Wegen, vor allem die Berücksichtigung einzelner, spezieller Nutzergruppen [FG10]. Dazu gibt die ERA Empfehlungen wie der Straßenraum für spezielle Nutzergruppen zu gestalten ist. Die dort beschriebenen Faktoren können aber nur spärlich auf die allgemeinen Einflussfaktoren einer komfortablen Fahrradstrecke projiziert werden. Prinzipiell empfiehlt die ERA allerdings eine getrennte Führung des Radverkehrs vom Kraftfahrzeugverkehr, soweit möglich. Des Weiteren, zur Minimierung des Kraftaufwandes, Oberflächen mit geringem Rollwiederstand, die Minimierung vermeidbarer Störungen, unnötiger Halte und Zeitverluste. Zudem definiert Sie für nahräumige Radverkehrsanbindungen eine angestrebte Fahrgeschwindigkeit von 20 bis 30 km/h und eine daraus abgeleitete maximale Dauer an Zeitverlusten, bedingt durch Anhalten und Warten, von 35 Sekunden je Kilometer.

Eine Studie an der Universität Maryland bestätigte die Annahme, dass sich Pendler durch Wege abseits des Kfz-Verkehrs ermutigen lassen das Rad zu nutzen [AC09]. Diese Studie führte eine Online-Umfrage mit Studenten der University of Maryland durch, die in einem Radius von maximal fünf Meilen zum Campus wohnen. Die größten Motivationen für Radbesitzer mit dem Fahrrad zu fahren, waren demnach ein eigener Fahrradstreifen, sowie die separate Führung zum Kfz-Verkehr. Aber auch bessere Beleuchtung und eine gute Karte mit lokalen Fahrradwegen motivierten die Probanden das Rad zu nutzen. Auf die Frage, was die Studenten davon abhalte das Fahrrad zu nutzen, antwortete die Mehrheit mit dem fehlenden Gefühl von Sicherheit im Straßenverkehr und dem schlechten Zustand der Straßenräume.

Inwiefern sich Faktoren wie die Luftschadstoffbelastung oder Wartezeiten an Kreuzungen auf das Fahrradverhalten auswirken ist bisher nicht empirisch untersucht worden.

### 2.2 Sensordatenerhebungen am Fahrrad

In einer vergleichbaren Studie wurde in der chinesischen Millionenstadt Changzhou ein Fahrradsensor entwickelt und getestet, der die Luftverschmutzung an Straßenräumen messen sollte [XBA15]. Verwendet wurden ein Aerosolgassensor, sowie ein Sensor für $CO_2, N_2, NO_x, CO$. Die Sensoren, sowie ein GPS-Empfänger wurden mit einem Mikroprozessor verbunden. Die Untersuchung zeigte, dass an Straßen mit großen Verkehrsmengen deutlich erhöhte Mengen Feinstaub gefunden wurden. Die Feinstaubwerte stellten sich als besonders guter Indikator für verkehrsbedingte Luftverschmutzung an Straßenräumen heraus.

Bei der Erkennung der Oberflächenbeschaffenheit und –Qualität, sowie zur Erfassung von Hindernissen während des Fahrradfahrens mit Hilfe von einem Ultraschallsensor [TNH15] und Smartphone-Beschleunigungs-Sensorik [HMM13] konnten eingeschränkt Erfolge verzeichnet werden (Abbildung 1) Die Systeme konnten größere Unebenheiten erkennen, erforderten jedoch eine umständliche, komplett starre Anbringung am Fahrrad.

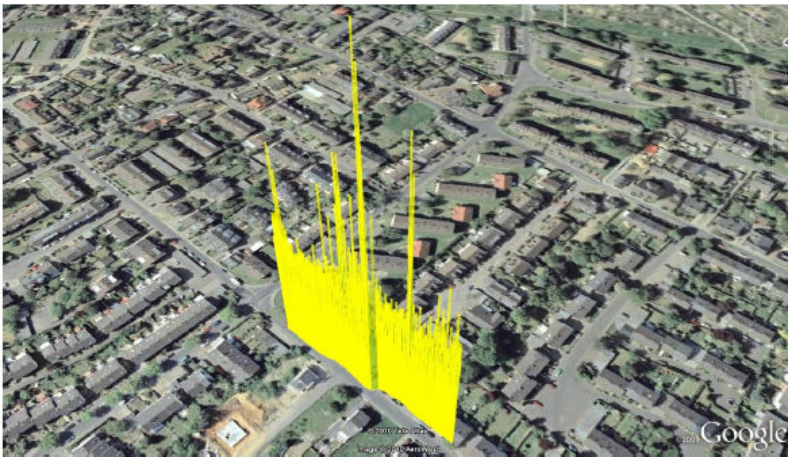


Abb. 1: „Bumps on the road“, [HMM13]

Eine britische Studie beschäftigte sich mit der Tauglichkeit von MEMS-Sensorik an Fahrrädern [MKL15]. Ziel war eine Art Inertialortung mit Hilfe der Beschleunigungs- und Orientierungsdaten zu schaffen. Sie fand heraus, dass weder Beschleunigungssensorik, noch Gyroskope alleine brauchbare Ergebnisse liefern. Eigenständig unterliegen beide Messverfahren hohen Fehlereinflüssen. Durch die Kombination der Daten beider Systeme unter Zuhilfenahme der Kalman-Filter können akkurate Resultate erzielt werden, bei denen Fehlereinflüsse weitestgehend eliminiert wurden.

Auch im Bereich der Höhenmessung im Fahrradverkehr wurde bereits eine Untersuchung durchgeführt. Diese hat mit Hilfe der Sensorik eines Smartphones GPS- und Beschleunigungsdaten erhoben und verknüpft [De15]. Als Ergebnis ließen sich ein Höhenverlauf,

sowie ein Verlauf der einzelnen Achsbeschleunigungen darstellen. Ziel der Untersuchung war es, Radfahrern bessere Informationen über mögliche Fahrradstrecken geben zu können.

Untersuchung mit dem Ziel, die Gesamtheit an Komforteinflüssen für den Fahrradverkehr, anhand eines Sensormodules zu erfassen und auszuwerten sind bisher nicht vorhanden. Erst die Gesamtheit an Einflüssen erlaubt es jedoch Wechselwirkungen und Fehlereinflüsse der Einzelfaktoren zu berücksichtigen.

### 2.3 Verwandte Datensammlungen

Ähnliche Fahrrad-Informations-Systeme sind in dem Umfang bisher noch nicht vorhanden. Das zum OpenSource-Projekt OpenStreetMap gehörige OpenCylceMap soll Informationen geben, welche Straßen als Fahrradstrecken besonders tauglich sind [GL16]. OpenCycleMap greift auf dieselbe Datengrundlage zu wie OpenStreetMap, stellt diese jedoch angepasst für Fahrradfahrer dar. Dabei beschränkt sich der dargestellte Inhalt jedoch auf Fahrradwege, Fahrradläden, und Unterstände.

Etwas mehr Anpassungsmöglichkeiten bietet BBBike [BB16]. BBBike bietet eine Online-Routensuche mit unterschiedlichen Routenkriterien. Nach Eingabe des Quell- und Zielortes lassen sich bevorzugte Geschwindigkeit, bevorzugter Straßentyp und -Oberfläche auswählen. Zusätzlich gibt es die Möglichkeiten Ampeln und unbeleuchtete Wege zu meiden, sowie „grüne“ Wege zu bevorzugen. Die Datengrundlage basiert dabei auf manuell eingetragenen Straßeneigenschaften. BBBike ist auch als Smartphone-App in begrenzter Funktionalität zu erhalten. Die Input-Daten sind nicht öffentlich zugänglich, sondern dienen nur als Hintergrundinformation für die Routensuche.

Viele Portale wie gps-tour.info oder der ADFC stellen empfohlene Routen zur Verfügung. Diese Routen sind manuell angelegt und nicht individualisierbar. Sie unterliegen subjektiven Unterscheidungskriterien der Routenautoren.

## 3 Komfortfaktoren

Die bisherigen Untersuchungen lassen eine grobe Kategorisierung der komfortbedingten Einflüsse auf den Radverkehr zu. Dabei lassen sich prinzipiell die Einflussbereiche Straßenraum, Umwelt und Sicherheit abgrenzen. Die drei Einflussbereiche sind dabei sehr eng miteinander verbunden, haben Überschneidungen und stehen miteinander in Wechselwirkung.

### 3.1 Einflussbereich Straßenraum

Im Bereich Straßenraum sind die wohl am schwierigsten zu erfassenden Faktoren angesiedelt. Der Einflussbereich Straßenraum umfasst alle Faktoren, die durch die vorhandene

Infrastruktur bedingt sind. Als wesentlicher Faktor ist hier die Streckenführung zu nennen. Diese hat vorrangig Einfluss auf die Verkehrssicherheit der Radfahrer, sowie auf deren Wartezeiten. Je sicherer sich der Radfahrer fühlt, desto eher wird er dieses Verkehrsmittel nutzen [DV14]. Mit Hilfe von Sensorik das Gefühl von Sicherheit zu testen, mag eventuell möglich sein, allerdings ist es nicht vorgesehen den Fahrer mit Sensorik zu bestücken, sondern das Fahrrad. Daher kann die direkte Sicherheit im Straßenverkehr nicht bemessen werden, allerdings Indikatoren für Sicherheitsprobleme, wie zum Beispiel starke Abbremsvorgänge. In Gefahrensituationen wird es zumeist zu starkem Abbremsen kommen. Bei solchen Gefahrenbremsungen treten stärkere Kräfte auf, als bei üblichen Abbremsvorgängen. Durch die Aufzeichnung von Beschleunigungswerten in allen drei Freiheitsgraden, in Verbindung mit GPS-Koordinaten können Gefahrenstellen mit Hilfe von Sensorik ermittelt werden.

Normalerweise wird ein Fahrradfahrer strecken meiden, in denen er erheblich durch den Kraftfahrzeugverkehr behindert wird. Einerseits wird dieser Einfluss durch die Erfassung der Abbremsvorgänge ermittelt und zum anderen können Umgebungslärm oder Luftschadstoffe ermittelt werden, die Rückschlüsse über naheliegenden Kraftfahrzeugverkehr zulassen. Die Faktoren Lärm und Luftschadstoffe werden grundsätzlich aber eher in den Bereich Umweltfaktoren fallen. Ein weiterer Überschneidungsbereich mit dem Bereich Umwelt lässt sich aus Lichteinstrahlungsstärken ableiten. Die Sonnenstrahlung. Je nach Situation und Uhrzeit lassen sich aus der Sonneneinstrahlungsstärke, sowie der Farbwerte der Lichtreflexion, eventuelle Rückschlüsse über nebenstehende Bebauungen ziehen.

Die Straßenraumgestaltung ist situativ komplett individuell und es lassen sich daher nur sehr schwer pauschale Aussagen über den positiven, beziehungsweise negativen Einfluss dieser tätigen. Die Wegewahl eines einzelnen Probanden gibt jedoch Rückschlüsse über seine persönlichen Präferenzen. Umfasst die Menge der Probanden, die ein Sensormodul an Ihrem Fahrrad haben, eine ausreichend große Anzahl, so könnten aus der Gesamtmenge an Teilwegen auf einem bestimmten Streckenabschnitt theoretisch Rückschlüsse über den Einfluss der Straßenraumgestaltung gezogen werden. Der Mensch ist hierbei sozusagen der Sensor. Wird eine Strecke überdurchschnittlich oft genutzt, so kann davon ausgegangen werden, dass die Streckenführung und/oder die Straßenraumgestaltung hier vorteilhaft für das Fahrrad ist. Denkbar wäre auch ein direkter Feedback-Knopf am Sensormodul, wenn einem der momentane Streckenabschnitt besonders gefällt oder nicht.

Weitere Einschränkungen für den Komfort einer Fahrradstrecke sind Streckenverlaufsspezifische Eigenschaften wie extreme Steigungen und Gefälle, starke und häufige Kurvenfahrten, sowie häufige Wartezeiten.

Starke Steigungen sind von enthusiastischen Fahrradfahrern zwar mitunter sogar gewollt, stören den normalen Fahrradfahrer aber eher bei seiner Fahrt. Bereits ab Steigungen von 3% ist der Kraftaufwand für die Steigungsbewältigung ebenso hoch, wie der Kraftaufwand für die Bewältigung des Luftwiederstandes [SS07]. Zu einer Datenerhebung zur Komfortabschätzung von Fahrradteilstrecken muss eine Höhenerfassung demnach definitiv dazugehören.

Je nach Winkel der Kurve, kann diese die freie Fahrt erheblich beeinflussen. Vor starken Kurven muss abgebremst und anschließend wieder beschleunigt werden. Ebenso wie starke Steigungen, ist dies wohl eher nur von Radfahrer-Enthusiasten gewollt. Kurvenfahrten sollten deshalb auch erfasst werden.

Oft spielt auch der Fahrbahnbelag eine Rolle für eine komfortable Fahrradfahrt. Je nach Federung können häufige Erschütterungen oder gar Schlaglöcher das Wohlbefinden des Fahrers erheblich beeinträchtigen. Zudem führen ungleichmäßige Beläge zu einer Erhöhung des Kraftaufwandes.

### 3.2 Einflussbereich Umwelt und Erholung

Wie bereits in einigen vorherigen Untersuchungen beschrieben, ist das Fahrrad als Verkehrsmittel nicht nur aufgrund seiner Effizienz genutzt, sondern oft auch wegen dem Erholungsfaktor. Besonders zum Tragen kommt dieser natürlich im Bereich der Freizeitverkehre. Laut dem MiD sind 36% aller zurückgelegten Wege mit dem Fahrrad Freizeitverkehre [II10].

Die Erholung wird sich beim Fahrradfahren oft stärker ausprägen, wenn die Fahrt in naturnahen Bereichen stattfindet, als in überfüllten Hauptverkehrsstraßen. Direkt messbar ist dieser Einfluss durch Luftschadstoffsensoren. Hierbei ist vor allem die Feinstaubbelastung zu nennen. Wie die Changzhou-Studie [XBA15] zeigte, ist dieser ein besonders guter Indikator für die örtliche Schadstoffbelastung durch Kraftfahrzeuge. Wird eine hohe Feinstaubbelastung im Straßenraum gemessen, kann man davon ausgehen, dass weitere verbrennungsbedingte Luftschadstoffe vermehrt vorhanden sind. Hohe Konzentrationen von Luftschadstoffen treten vor allem an Hauptverkehrsachsen und in Luftaustauscharmen Straßenräumen auf. Diesen Luftschadstoffen ist der Fahrradfahrer im Gegensatz zum Autofahrer direkt ausgesetzt.

Eine weitere starke Beeinträchtigung des Erholungsfaktors stellt eine hohe Lärmbelastung dar. Ständiger Verkehrs- oder Stadtlärm verursacht Stress. Die Lärmbelastung kann direkt mit einem Mikrophon gemessen werden. In dicht bebauten, städtischen Straßenräumen wird der Schall reflektiert und verstärkt sich zusätzlich.

Abgeleitete Indikatoren für die Erholung während der Fahrradfahrt sind die Lichteinstrahlung, sowie das Fernbleiben von kraftfahrzeugverkehrsbedingten Wartezeiten.

### 3.3 Einflussbereich Sicherheit

Die ERA betont die hohe Bedeutung der Sicherheit des Verkehrssystems Fahrrad [FG10]. Studien, wie jene an der Universität Maryland, bestätigen, dass sich das Gefühl der Sicherheit besonders auf die Radnutzung niederschlägt. Mehr als 60% aller Fahrradbesitzer

befürworteten die Aussage, dass separate Fahrradstreifen sie ermutigen würden das Fahrrad zu nutzen. Beinahe 40% der Fahrradfahrer gaben an, dass eine bessere Straßenbeleuchtung sie zu häufigerer Fahrradnutzung animieren würde [AG09].

Die getrennte Führung des Radverkehrs ist ein Thema, dass sich in allen drei Einflussbereichen wiederfindet. Indikatoren für die gemeinsame Nutzung eines Straßenraumes durch Fahrräder und Kraftfahrzeuge könnten sein; die erhöhte Luftschadstoffanwesenheit, gewissen Geräuschmuster durch vorbeifahrende Kfz und starke Abbremsvorgänge in Gefahrensituationen oder Konfrontationen.

Besonders gefährlich sind unübersichtliche, oder schwer verständliche Verkehrssituationen. Meist sind dies Knotenpunkte. Da der Radfahrer weitestgehend ungeschützt gegen Unfälle ist, können schon kleinere Kollisionen mit dem Kraftfahrzeugverkehr zu großen gesundheitlichen Schäden führen.

Der Einflussfaktor Beleuchtung kommt nachts gesondert zum Tragen. Eine gute Straßenbeleuchtung gibt dem Radfahrer ein gesteigertes Gefühl von Sicherheit in der Nacht [DV14]. Die Straßenbeleuchtung kann in Abend-/Nachtstunden über die Lichteinstrahlung bemessen werden.

## 4 Datenerhebung

Das entwickelte Sensormodul besteht hauptsächlich aus Mikrocontrollerbausteinen und Sensormodulen des Herstellers Tinkerforge. Die Tinkerforge-Module bieten den Vorteil, dass sie sehr unkompliziert miteinander zu verknüpfen sind und eine einheitliche, gut dokumentierte API bieten. Auf diese Weise lassen sich Verwendung und Einsatzbereich der Sensoren anpassen, ohne zusätzliche Hardware und unterschiedliche Programmiersprachen nutzen zu müssen [TF16].

### 4.1 Sensorik

- IMU

  Die verwendete IMU (Inertial Measurement Unit) ist das Tinkerforge IMU Brick 2.0. Das in Abbildung 2 dargestellte Brick nutzt den BNO 055-Sensor von Bosch Sensortec [BS14]. Der Sensor vereint die MEMS-Sensoren eines triaxialen Beschleunigungsmessers, eines Gyroskops und eines Triaxial-Magnetometers. Das IMU Brick 2.0 beinhaltet zusätzlich die Komponenten einer AHRS (Attitude and heading reference system). Das Kalman-Filter berechnet Quaternionen, lineare Beschleunigung, Schwerkraftvektor sowie unabhängige Gier-, Roll- und Nick- Winkel. Das Bricklet kalibriert sich zudem selbst während des Betriebes. Fehlereinflüsse sind dadurch bereits weitestgehend minimiert. Die IMU bietet, als Folge dessen, die

Möglichkeit die Orientierung im Raum nicht nur in Eulerwinkeln auszulesen, sondern auch in Quaternionen. Dies ist in diesem Anwendungsfall nicht nötig da die Gefahr eines Gimbal Locks beim Fahrradfahren nicht gegeben ist und die Orientierung des Fahrrades nicht in einem externen Koordinatensystem betrachtet werden muss. Des Weiteren gibt das Bricklet die lineare Beschleunigung aus, die um den Einfluss der Erdbeschleunigung bereinigt ist. Das Kalman-Filter wird bereits durch die API der Sensorik unterstützt und muss nicht nachträglich berechnet werden.

Abb. 2: IMU Brick 2.0, [TF16]

- GPS

  Das GPS Bricklet von Tinkerforge nutzt das PA6H-GPS-Modul von GlobalTop Technology. Laut Hersteller sind die Positionsdaten bis auf 3 Meter genau [GT11]. Das GPS-Modul liefert GGA-Datensätze (Global Positioning System Fix Data). Diese beinhalten die aktuelle UTC-Zeit, Breiten- und Höhengrad, sowie die Anzahl genutzter Satelliten und den „Position Fix Indicator“. Der Position Fix Indicator liefert Information ob aktuell GPS-Daten, oder sogar DGPS (Differential GPS) -Daten verfügbar sind. Genauere Informationen zum Fix-Status und der damit zusammenhängenden Satellitenverfügbarkeit, sowie Informationen zur Positionsgenauigkeit (PDOP, HDOP und VDOP) werden in GSA-Daten übermittelt. Des Weiteren können aus RMC (Recommended Minimum Navigation Information) - und VTG (Course and speed information relative to ground) - Daten auch Informationen zur aktuellen Geschwindigkeit des Objektes auf der Erdoberfläche gewonnen werden.

- Dust Detector

  Das Tinkerforge Dust Detector Bricklet nutzt den Sharp GP2Y1010AU0F-Compact Optical Dust Sensor. Der Sensor bestrahlt mit einer Infrarot-Diode die Luft [SC06]. Das von Staubpartikeln reflektierte Licht wird mit Hilfe eines Fototransistors detektiert. Der Sensor kann so Partikel ab 1µm erkennen. Demnach können die Feinstaube

PM10 und PM2,5 nachgewiesen werden. Ultrafeine Partikel (≤0,1 µm) können nicht gemessen werden. Bis zu einer Partikeldichte von 500 µm/m³ können anhand der Ausgangsspannung sehr genau die Mikropartikel in der Luft gemessen werden (Abbildung 3).

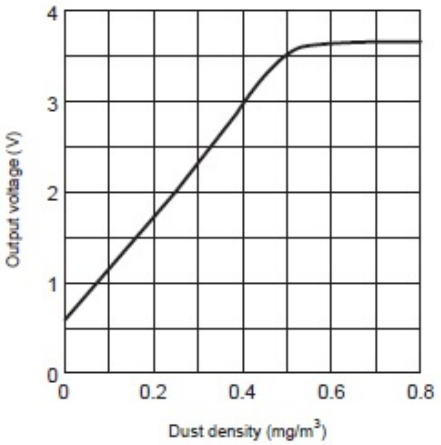


Abb. 3: Output Voltage vs. Dust Density, [SC06]

- Temperatur, Luftfeuchte und Barometer

  Das Tinkerforge Temperatur-Bricklet nutzt den Texas Instruments TMP102 Low Power Digital Temerature Sensor (Abbildung 4). Dieser ist im Bereich zwischen -25°C und +85°C auf 0,5°C genau [TI07]. Die Luftfeuchte wird mit Hilfe des Honeywell HIH-5030 Low Voltage Humidity Sensors gemessen.

  Der Sensor misst in 0,1%-Schritten die relative Luftfeuchte zwischen 0% und 100% [HI10]. Der Hersteller gibt dabei in Bereichen zwischen 11% und 89% Luftfeuchte eine Genauigkeit von ±3% an.

  Das Barometer Bricklet nutzt den MS5611-01BA01 Barometric Pressure Sensor von measurement specialities. Die Messgenauigkeit des Sensors ist von der Temperatur abhängig. Bei 25°C liegt die Messgenauigkeit bei ±1,5 mbar, zwischen 0°C und 50°C ist die Messgenauigkeit bei ±2 mbar: [MS12] Mit Hilfe der simultan gemessenen Temperatur kann durch die barometrische Höhenformel der Luftdruck in Referenz zur Meereshöhe und temperaturkorrigiert berechnet werden.

- Licht-, Farb- und Lautstärkesensorik

  Der TCS3472 Color Light-to-digital Konverter von Taos, der im Color Bricklet von Tinkerforge verbaut ist, misst die Farbstärken RGB, die Farbtemperatur und die Beleuchtungsstärke [TA12]. Die Farbstärken werden für die jeweiligen Farben Rot, Grün, Blau in 16Bit-Werten (0-65535) zurückgegeben. Die Helligkeit in

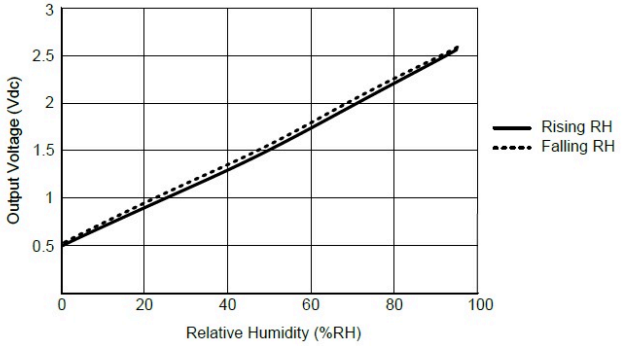


Abb. 4: Output Voltage vs. Relative Humidity, [HI10]

Lux. Der Sensor kann über die Verstärkung (Gain) und die Integrationszeit an die Nutzungsbedingungen angepasst werden.

Das Sound Intensity Bricklet misst die Schallintensität mit einer Mikrofonkapsel. Der zurückgegebene Lautstärkepegel wird zwischen 0 und 4095 zurückgegeben. Inwiefern dieser in Dezibel umrechenbar ist wird nicht angegeben [TF16]. Insofern kann die Lautstärke nur relativ angegeben werden, beziehungsweise muss durch Testmessungen referenziert werden.

- RED Brick

  Das RED (Rapid Embedded Development) -Brick ist das Herzstück des Sensormoduls (Abbildung 5). Es handelt sich hierbei um einen Einplatinencomputer, mit einem 1 Gigahertz (Allwinner A10s) -Prozessor, mit 512 Megabyte DDR3 SDRAM [TF16].

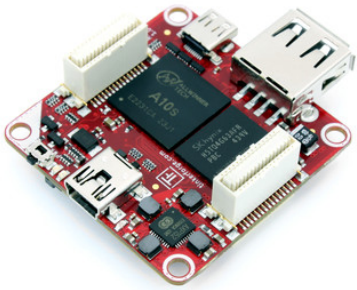

Abb. 5: RED Brick, [TF16]

Als Flash-Speicher wird eine 16 GB-Mirco-SD-Karte genutzt. Das Brick nutzt als Betriebssystem Debian-Linux. Die Stromversorgung, sowie serielle Verbindungen zu einem externen PC können über einen Mini-USB-Anschluss realisiert werden.

Das RED Brick wird dazu genutzt die anderen Bricklets zu steuern, die Sensordaten auslesen zu lassen und zu speichern. Über den Brick Viewer können ausführbare Programme in zahlreichen Programmiersprachen auf den Brick gespielt werden. Zudem kann direkt auf die Linux-Shell des Bricks zugegriffen werden.

Über den Tinkerforge Stack-Connector ist das RED Brick mit dem IMU-Brick und einem Master-Brick verbunden. An diese wiederum sind die weiteren Bricklets angeschlossen.

### 4.2 Programmierung

Das eigentliche Programm, das die Sensorik und den Auslese- und Speichervorgang steuert ist in Java geschrieben. Das Programm wird automatisch gestartet, wenn der RED Brick gebootet hat.

Vor der eigentlichen Sensorauswertung soll das Programm einige Einstellungen vornehmen. Ist ein USB-Stick angeschlossen, so wird dieser als Export-Verzeichnis der Daten gewählt. Das Exportverzeichnis wird in den globalen Variablen festgelegt. Ist kein USB-Stick angeschlossen werden die Daten in einem Ordner auf dem RED Brick gespeichert.

Anschließend wird im gewählten Verzeichnis nach einer Konfigurationsdatei gesucht. Es handelt sich hierbei um eine Textdatei die eine Erheber-ID, den zugehörigen Namen, sowie die Anzahl der bisher erhobenen Fahrten dieses Erhebers enthält. Die Erheberinformationen werden, falls vorhanden, ausgelesen und die Fahrt-ID um eins erhöht. Falls keine config-Datei vorhanden ist, wird eine neue erstellt und die Werte auf default-Werte gesetzt. Auf diese Weise können Metadaten zu den Erhebungsfahrten gesammelt werden. Durch die Zuweisung eindeutiger Erheber-ID´s und Fahrt-ID können beispielsweise die Anzahl gefahrener Kilometer, Minuten oder Streckenabschnitten je Person und Fahrt erfasst werden. Zudem kann jeder Erheber mit einem USB-Stick und der darauf befindlichen Config-Datei das Sensormodul für sich nutzen und erhält anschließend die Sensordaten-Auswertung auf seinem USB-Stick.

Die Sensordatenauswertung wird in CSV-Dateien exportiert. Die Dateien werden jeweils mit dem aktuellen Datum benannt. Zu Beginn der Erhebung wird deshalb jeweils geprüft ob eine CSV-Datei des aktuellen Datums bereits vorhanden ist, ansonsten wird eine Initiale CSV-Datei erstellt und die Tabellenüberschriften angefügt. Vor der Eigentlichen Erhebung müssen noch einige Sensoren kalibriert werden.

Die Sensordatenerhebung wird prinzipiell durch zwei Kontrollstrukturen realisiert. Hierbei handelt es sich einerseits um eine periodische Auslesung von mehreren Sensorwerten. In einem festgelegten Sekunden-Intervall wird ein Runnable gestartet. Dieses liest Temperatur, Luftfeuchte, Luftdruck, RGB-Farbintensitäten, Lichtstärke, die Partikeldichte, GPS-Koordinaten, sowie den zugehörigen EPE (Estimated Positioning Error), die geschätzte

Geschwindigkeit auf der Erdoberfläche, Euler-Winkel, sowie das Datum und die Uhrzeit aus. Diese Daten werden zusammen mit den Metadaten in die CSV exportiert.

Nebenläufig laufen verschiedene EventListener. Diese werden aktiviert, falls gewisse Sensorwerte über- beziehungsweise unterschritten werden. Diese Sensorwerte sind die linearen Beschleunigungen in der x-, y- und z-Achse, sowie der Schallpegel. Sobald einer dieser Werte eine bestimmte Grenze überschreitet, werden der jeweilige Wert und die Kennzeichnung des auslösenden Events mit dem aktuellen Datum und der Uhrzeit in eine separate CSV-Datei exportiert.

Da die interne Uhr des RED Bricks sich nicht automatisch synchronisiert und daher nicht das korrekte Datum und Uhrzeit ausgibt, wird jeweils pro Fahrt ein Referenzwert vom GPS-Bricklet gespeichert. Somit kann im Nachhinein die tatsächliche Uhrzeit und das Datum bestimmt werden.

### 4.3 Kalibrierung

Die Kalibrierung der Sensoren dient der Anpassung an Erhebungs- und Anforderungsbedingungen. Hierzu zählen das Setzen von Parameter, Referenzwerten, Grenzen, sowie das Nivellieren.

Zu Beginn einer neuen Erhebung werden die Verstärkung (Gain) und die Integrationszeit des Color Bricklets eingestellt. Die Verstärkung ist prinzipiell davon abhängig, ob am Tag oder in der Nacht gefahren wird. Tagsüber ist die Lichtstärkemessung auch ohne Verstärkung ausreichend. Es hat sich jedoch tagsüber gezeigt, dass bei einem vierfachen Gain Farben besser erkannt werden und auch in der Nacht ein klarer Eindruck der Beleuchtungsstärke zu erkennen ist. Eine erhöhte Integrationszeit verlangsamt zwar die Messung, erhöht jedoch die Genauigkeit. Da in Abständen von mehreren Sekunden gemessen wird, kann die Integrationszeit relativ hoch, auf 101ms gesetzt werden.

Zusätzlich wird zu Beginn der Messung der Referenzluftdruck auf null gesetzt. Die erhobenen Werte stellen dann Luftdruckveränderungen gegenüber der Starthöhe dar. Somit kann keine exakte Höhenangabe getroffen werden, sondern lediglich Aussagen über Höhenveränderungen. Diese sind jedoch merkbar präziser.

Zudem werden die Auslösungsgrenzen für die IMU bestimmt. Durch verschiedene Testversuche wurden die Grenzen für die X-, Y- und Z-Beschleunigung auf 4m/s², 2m/s² und 2,5m/s² gesetzt. Diese sind so gesetzt worden, dass bereits kleinere Bodenunebenheiten, leichte Abbremsvorgänge und starke „Fahrrad-Wackler“ aufgezeichnet werden.

## 5 Evaluation / Feldtest

Das Sensormodul wurde in und außerhalb der Stadt Karlsruhe getestet um Erkenntnisse über die Tauglichkeit der einzelnen Messgruppen, sowie deren Aussage und Sensitivität zu erhalten. Die erhobenen Daten wurden anschließend mit MS Access nachträglich formatiert und exportiert, sodass erste Analysen und Visualisierungen mit dem Geoinformationssystem QGIS erstellt werden können. Diese dienen der Datenevaluation. Mit Hilfe der GIS-Software werden die jeweiligen Sensordaten gemappt und differenziert dargestellt. Das Ergebnis kann dann hinsichtlich logischer Korrektheit, Erwartungswert und Aussagekraft überprüft werden.

Die Abstände der periodischen Sensordatenauswertung sind auf 5 Sekunden festgelegt. Dadurch ergibt sich bei einer Geschwindigkeit von 20 km/h ein räumlicher Messabstand von etwa 5,5 Metern (Abbildung 6). Die Messdichte ist somit hoch genug um, räumlich sehr differenzierte Aussagen ableiten zu können.

Die Evaluation beruht auf Daten aus vier Testfahrten. Während dieser Testfahrten wurden 2.756 gültige (mit gültigen GPS-Koordinaten) periodische Datensätze und 21.941 Event-Daten erhoben.

Pro periodische erhobenem Datensatz wurden also fast acht Event-Daten erhoben. Da die Event-Daten zur Ermittlung von streckenspezifischen Ausnahmesituationen gedacht sind, sollten die Auslösungsgrenzen der Events erhöht werden. Dies muss ansonsten bei der Auswertung durch zusätzliche Filter geschehen.

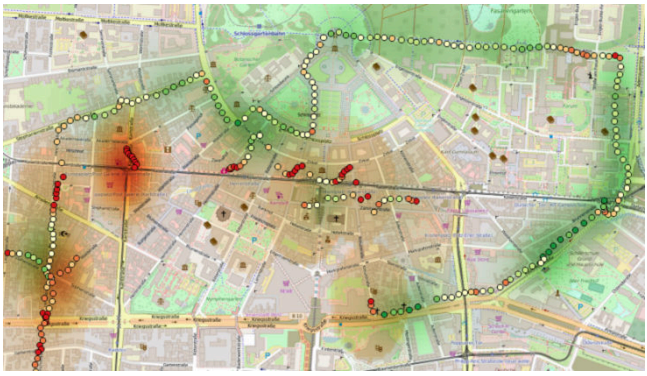

Abb. 6: GPS-Wegpunkte, Kartengrundlage: openstreetmap.org

### 5.1 Geschwindigkeitsdaten

Der GPS-Sensor gibt die Geschwindigkeit in Knoten aus (Abbildung 7). Die ausgegebenen Werte sind hierbei leicht fehlerbehaftet. Da das Sensormodul jedoch zur massenhaften Datenerhebung gedacht ist, gleichen sich „Ausreißer“ gegenseitig aus, sodass ein plausibles

Ergebnis entsteht, wenn ausreichend Daten vorhanden sind. Die Geschwindigkeiten sind oft zu hoch, sodass Geschwindigkeiten bis 50 km/h gemessen werden. Daher eignen sich die Ergebnisse weniger zu präzisen Einzelaussagen über das Geschwindigkeitsverhalten, allerdings bietet sich die Möglichkeit der prinzipiellen Ermittlung von Standzeiten und Verzögerungen. Die Ergebnisse spiegeln trotz der fehlerhaften Werte, sehr gut wieder ob ein Streckenabschnitt konstant und störungsfrei befahren werden kann, oder ob Verzögerungen aufgetreten sind. Die Daten sind nicht absolut, allerdings relativ sehr aussagekräftig. Standzeiten werden sehr gut erkannt.

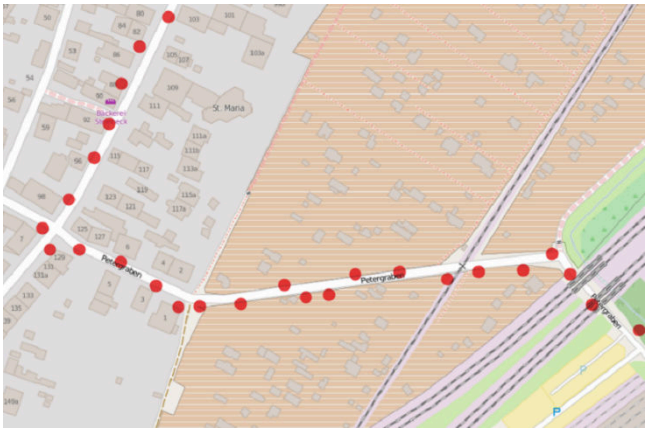


Abb. 7: Geschwindigkeitswerte, Kartengrundlage: openstreetmap.org

## 5.2 Feinstaubbelastung

Die Auswertungen der Partikeldichte sollen einen direkten Rückschluss über die Feinstaubbelastung zulassen. Nach nur vier Testfahrten kann dies nicht abschließend bestätigt werden. Die Messwerte sind nicht sprunghaft und wirken realistisch. Da die Werte allerdings auch von vielen weiteren Faktoren (Wind, Umwelt, Tageszeit, . . . ) beeinflusst werden, können präzise Rückschlüsse erst nach einer sehr hohen Datendichte gezogen werden. Für einen direkten Vergleich sind zwei Vergleichsstrecken unter selben Testbedingung (selber Tag, unmittelbar hintereinander) abgefahren worden. Die Vergleichsstrecken waren die Pulverhausstraße in Karlsruhe und die, nahezu parallele, Fahrradstrecke an dem Fluss „Alb“ (Abbildung 8).

An der vielbefahrenen Hauptstraße (Pulverhausstraße) waren deutlich höhere Feinpartikeldichtewerte vorzufinden, als an der Fahrradstraße an der „Alb“, die entlang des Flusses, abseits des Kfz-Verkehrs führt.

Abb. 8: Feinstaubpartikeldichte, Kartengrundlage: openstreetmap.org

### 5.3 Temperatur und Luftfeuchte

Die Auswertung der Temperatur zeigt einen klaren Trend. Je urbaner und dichter besiedelt die Erhebungsumgebung ist, desto höher ist die Temperatur. Da jedoch die Temperatur je nach Tages- und Jahreszeit, sowie bei direkter Sonneneinstrahlung noch erheblicher schwankt, als durch die Besiedlung bedingt, sind Rückschlüsse anhand der Temperaturwerte nur durch eine sehr hohe Datenverfügbarkeit oder aufwendige Glättung und Filterung möglich.

Die Messwerte der Luftfeuchtemessungen sind plausibel und ergeben einen klaren Verlauf, lassen allerdings nach ersten Tests keine direkten Rückschlüsse zu. Lediglich eine leicht erhöhte Luftfeuchtigkeit in Wald- und Grünanlagen ist zu verzeichnen. Allerdings dienen Temperatur und Luftfeuchte eher zur Einordnung, beziehungsweise Korrekturrechnung anderer Sensorwerte, weniger als direkter Indikator für räumlich differenzierte Komfortbedingungen des Radverkehrs.

### 5.4 Höhenverlauf

Das Barometer Bricklet misst die Luftdruckveränderung im Bezug zum Anfangsniveau. Um Höhenänderungen während der Fahrt zu erkennen, müssen zusätzlich die Differenzwerte zwischen den Einzelwerten ermittelt werden. Ist die Differenz $\text{Wert}_x - \text{Wert}_{x+1}$ negativ,

so ist der Luftdruck angestiegen. Steigender Luftdruck bedeutet (bei gleichbleibenden Rahmenbedingungen) sinkende Höhe, also Gefälle. Ist die Differenz positiv, so bedeutet dies Steigung. Betrachtet man die Extremwerte dieser Differenz $|Differenz| \geq 1mbar$ so ergibt sich ein stimmiges Bild: Oft treten starke Luftdruckveränderungen etwas zeitversetzt an Brücken und Unterführungen auf. Luftdruckabfall und -anstieg sind hier paarweise vorhanden.

Der Wert des Pitch-Winkels sollte ebenso Rückschlüsse über die aktuelle Steigung geben. Allerdings zeigte sich, dass an aufgezeichneten Extremstellen und starken Veränderungen des Pitch-Winkels tatsächlich nur sehr vereinzelt große Steigungen oder Gefälle vorhanden waren. Obwohl das Sensormodul fest am Fahrrad befestigt war, sind keine direkten Erkenntnisse aus den Pitch-Winkeln zu gewinnen.

### 5.5 Abbremsvorgänge

Zur Ermittlung starker Abbremsvorgänge wird mit Hilfe des IMU-Bricks die Y-Achsen-Beschleunigung gemessen. Erwartungsgemäß sollten erhöhte negative Y-Beschleunigungen bei behindertem oder beeinträchtigtem Fahren, beispielsweise durch Kfz-Verkehr oder erhöhtes Fußgängeraufkommen, auftreten. Abbildung 9 zeigt die negativen Y-Beschleunigungswerte im Karlsruher Stadtgebiet als Heat-Map. Die Ergebnisse spiegeln Erwartungswert und das subjektive Empfinden während der Testfahrt wieder: Besonders viele Abbremsvorgänge traten am Karlsruher Marktplatz, bedingt durch den hohen Fußgängerverkehr, sowie an signalisierten Kreuzungen auf.

Abb. 9: Heat-Map: Negative Y-Beschleunigungen, Kartengrundlage: openstreetmap.org

### 5.6 Bodenunebenheiten

Schlaglöcher, Hindernisse auf dem Boden und weitere potenziell störende Bodenunebenheiten werden ebenso mit Hilfe des IMU-Bricks detektiert. Die Beschleunigung in der Z-Achse

zeichnet eben solche Unebenheiten auf. Starke Ausschläge in der Z-Beschleunigung deuten auf schnelle, ruckartige Höhenveränderungen hin.

Während des Feldtestes wurde dies vor allem auf nicht-asphaltierten Strecken, Feldwegen und an Schlaglöchern getestet. Unasphaltierte Wege wurden mit leichten, kontinuierlichen Ausschlägen aufgezeichnet. Vermerkte Schlaglöcher und starke Wölbungen wurden allesamt mit hohen Z-Beschleunigungs-Beträgen verzeichnet. Die Ergebnisse spiegeln den Erwartungswert wieder.

### 5.7 Kurvenfahrten

Kurvenfahrten könnten sowohl mit Hilfe der X-Beschleunigung, als auch mit der Veränderung des Head-Winkels erfasst werden. Die Betrachtung der X-Beschleunigungsdaten ergab hierbei allerdings kein logisches Bild. Die Vertikalbeschleunigungen sind eher das Resultat aus unruhigem Fahrverhalten oder Wackeln des Fahrrades.

Die Auswertung der Differenzwerte des Head-Winkels hingegen zeigte sehr präzise und konsistente Ergebnisse zur Detektion von Kurvenfahrten. Besonders starke Kurven konnten auch mit Hilfe von Heat-Mapping der Differenzbeträge nachträglich ermittelt werden. Starke Kurvenfahrten resultieren aus einem großen Differenzbetrag der Head-Winkel zwischen zwei periodischen Messdatensätzen. Diese liegen fünf Sekunden auseinander. Um eine noch präzisere Auflösung von besonders „spitzen“ Kurven zu bekommen, müssten die Messabstände noch geringer gewählt werden. Allerdings konnte auch bei den bisher gewählten Messperioden hinreichend gute und plausible Ergebnisse erzielt werden (Abbildung 10).

Abb. 10: Heat-Map: Kurvenfahrten, Kartengrundlage: openstreetmap.org

### 5.8 Lichteinfall

Der Lichtsensor erkennt klare Unterschiede zwischen einer Fahrt bei Tageslicht uns einer Fahrt bei Nacht. Ebenso sind Zwischenwerte zu Zeiten der Dämmerung deutlich erkennbar.

Dicht bewaldete Gebiete sind deutlich am Lichteinfallspegel erkennbar. Betrachtet man ausschließlich Nachtfahrten und erhöht die Lichtempfindlichkeit, so ergibt sich auch ein konsistenter Lichtverlauf (Abbildung 11).

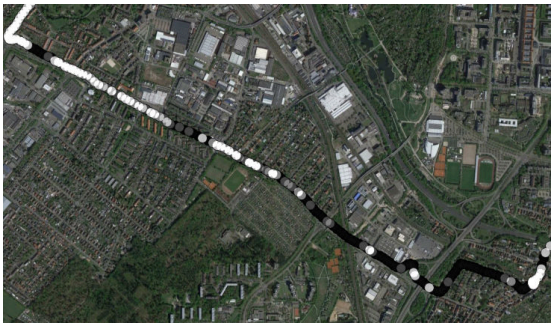

Abb. 11: Lichtintensität bei Nacht Pulverhausstraße, Kartengrundlage: googlemaps.com

Abschnitte mit guter, sowie Abschnitte mit mangelnder/fehlender Beleuchtung sind identifizierbar. Zur Verbesserung der Ergebnisse wäre es sinnvoll, den Gain je nach Jahreszeit und Tageszeit automatisch anzupassen.

Aus den Einzelfarbwerten RGB können, bei aktueller Kalibrierung, keine Rückschlüsse über die Begrünung oder sonstige Umgebungseigenschaften gezogen werden. Bei Tageslicht liegen die Werte meist gemeinsam sehr nahe an Ihrem Maximum und logische Veränderungen sind nicht zu erkennen. Durch Veränderung des Gains, können eventuell repräsentative Daten erhoben werden.

### 5.9 Metainformationen

Mit Hilfe von einfachen Abfragen können aus den erhobenen Datensätzen Metainformationen zum Fahrradverhalten gewonnen werden. Durch die eindeutige Zuweisung einer Erheber-ID und einer Fahrt-ID zu jedem Datensatz, sowie der Speicherung der genauen Uhrzeit mit Datum sind vielfältige Auswertungen möglich. Durch die Erstellung von Wegeketten aus den GPS-Daten sind beispielsweise auch durchschnittliche Wegelängen berechenbar.

Bei massenafter Datensammlung mit dieser Sensorik und minimalen Erheberinformationen, wie beispielsweise Alter und Geschlecht können auch Verhaltensanalysen zum Radverkehr erstellt werden. Unter Zuhilfenahme der soziodemographischen Erheberinformationen und zugänglichen Wetterinformationen können auch zeitliche Einflussfaktoren auf den Radverkehr bemessen werden.

## 6 Diskussion

Die Tinkerforge-Sensoren bieten einfache Schnittstellen und sind deshalb mit deutlich geringerem Aufwand kombinierbar und programmierbar, als verschiedene Einzelsensoren von unterschiedlichen Herstellern. Allerdings vereinfachen die Bricklets oft die eigentlichen Kalibrierungs- und Sensorfunktionen der verbauten Sensoren. Die in den Sensordatenblättern beschriebene API der eigentlichen Sensoren bietet in manchen Fällen zusätzliche, nützliche Sensorfunktionen an.

Aufgrund des geringen Ausmaßes des Feldtests sind abschließende Aussagen über die Einzelfunktionalitäten noch nicht möglich. In Einzelsituationsvergleichen konnte jedoch bereits ermittelt werden, ob die Sensorauswertung brauchbare Ergebnisse liefert. Besonders im Bereich der Höhenermittlung und der Licht- beziehungsweise Farbwertermittlung könnten mit Hilfe besserer Kalibrierung und nachträglicher Glättung der Ergebnisse präzisere Rückschlüsse getroffen werden.

Erst durch die Erfassung von Massendaten werden präzise und umfassende Analysen der Fahrradstrecken möglich. Kleinere Datenmengen führen zu einer starken Verfälschung der Ergebnisse. Beispielsweise führt ein kurzer Stopp am Bankautomaten zu einer Verzeichnung großer Wartezeiten. Durch die Glättung im Rahmen von Massendaten fallen diese Fehlereinflüsse größtenteils weg. Zur Erkennung von nicht-verkehrsbedingten Standzeiten, wie zum Beispiel dem Halten zum Geld abheben, muss weitere Hardware an das Sensormodul hinzugefügt werden. Denkbar wäre beispielsweise ein Sensor im Sattel zur Erkennung ob jemand auf dem Fahrrad sitzt, oder ein einfacher Knopf zum Pausieren der Aufzeichnung.

Durch weitere Präzisierung der Messergebnisse kann das entwickelte Sensormodul eine sehr gute Datengrundlage für weiterführende Untersuchungen schaffen. Durch die Einteilung der Einzelergebnisse in Werteklassen ist eine vereinfachte Darstellung und eine vereinfachte Weiterverarbeitung möglich. Mit Hilfe von Gewichtungsfaktoren für die jeweiligen Sensorergebnisse sollte es zudem möglich sein, negative und positive Einflüsse zu verschneiden, beziehungsweise gegeneinander verrechnen zu können. Durch die individuelle Anpassung der Gewichtungsfaktoren, kann jeder Nutzer der Daten einen eigenen Bewertungsschlüssel schaffen, durch den er individuell-angepasste Fahrradstreckenanalysen bekommen kann.

Zum tatsächlichen Einsatz des Sensormoduls müsste noch ein Sensor-Gehäuse entwickelt werden, das den Sensor vor Witterungseinflüssen und sonstigen Schäden schützt, jedoch die Sensorfunktionen nicht negativ beeinträchtigt.

## 7 Fazit

In Einzelfalluntersuchungen haben sich die meisten Erfassungsverfahren als belastbar gezeigt. Aus den gewonnenen Daten lassen sich bereits durch geringen Interpretationsaufwand Rückschlüsse zum Komfort der gefahrenen Fahrradstrecken gewinnen. Durch weitere

Feinjustierung, Kalibrierung und „tiefere“ Interpretation können die Ergebnisse präzisiert und erweitert werden. Individuelle Fehler bei den Sensorerfassungen können über große Mengen an Daten, also über eine große (breite) Masse an Erhebern, geglättet werden.

## Literaturverzeichnis


[AC09] Akar, G., & Clifton, K. J. (2009). The influence if individual perceptions and bicycle infrastructure on the decision to bike. 88th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington, D.C.

[BB16] bbbike.cgi. BBBike Routensuche. Abgerufen am 27. 06 2016 von http://www.bbbike.de/cgi-bin/bbbike.cgi

[BFG84] Bosselmann, P., Flores, J., Gray, W., Priestly, T., Anderson, R., Arens, E., Kim, J.-J. (1984). Sun, Wind, and Comfort A Study of Open Spaces and Sidewalks in Four Downtown Areas. Berkeley, California: University of California, Institute if Urban and Regional Development.

[BS14] Bosch Sensortec. (2014). Data Sheet BNO 055 Intelligent 9-axis absolute orientation sensor.

[De15] Dezani, H. (2015). Urban road optimization based on safety and cyclists´ effort required by bike tracks. IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems. Las Palmas, Spanien.

[DV14] Das Verkehrspolitische Programm des ADFC. (2014). Berlin: Allgemeiner Deutscher Fahrrad-Club e.V.

[FG10] FGSV, F. f.-u. (2010). Empfehlungen für Radverkehrsanlagen ERA. Köln: FGSV Verlag.

[GL16] Gravitystorm Limited. OpenCycleMap Documents. Abgerufen am 27. 06 2016 von http://www.opencyclemap.org/docs/

[Gö11] Göttlicher, S. (2011). "Weiche" Planungsinstrumente auf regionaler Ebene. In Angewandte Geographie. Heidelberg: Springer Verlag.

[GT11] Global Technology Inc. (2011). FGPMMOPA6H GPS Standalone Module Data Sheet. Taiwan.

[HI10] Honeywell International Inc. (2010). HIH-5030/5031 Series Low Voltage Humidity Sensors Datasheet. Golden Valley, Minnesota.

[HMM13] Hoffmann, M., Mock, M., & May, M. (2013). Road-quality classification and bump detection with bicycle-mounted smartphones. St. Augustin, GER: Frauenhofer IAIS.

[II20] infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Institut für Verkehrsforschung. (2010). Mobilität in Deutschland 2008. Bonn und Berlin: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.

[IS16] Infrastruktur, B. f. (2016). Bundesverkehrswegeplan 2030. Berlin: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur.

[MS12] Measurement Specialities. (2012). MS5611-01BA01 Barometric Pressure Sensor, with LCP cap Datasheet.

[MKL15] Miah, S., Kaparias, I., & Liatsis, P. (2015). Evaluation of MEMS Sensors Accuracy for Bicycle Tracking and Positioning. London, UK: IEEE.

[SC06] Sharp Corporation. (2006). GP2Y1010AU0F Compact Optical Dust Sensor.

[Sc09] Schäfer, K.-H. (2009). Öffentlichkeitsarbeit in der Verkehrsplanung. In Handbuch der kommunalen Verkehrsplanung. Berlin: VDE Verlag.

[SE14] Stadtenwticklungsforschung, I. f.-u. (2014). Transferstelle Mobilitätsmanagement. Abgerufen am 31. 05 2016 von http://www.mobilitaetsmanagement.nrw.de/cms1/index.php?option=com_content&view=article&id=201&Itemid=7

[SS07] Suhr, W., & Schlichting, H.-J. (2007). Mit Pedalkraft gegen Berge und Wind. In Physik unserer Zeit (S. 294-298). Weinheim: Wiley-VCH Verlag.

[TA12] Texas Advanced Optoelectronic Solutions Inc. (2012). TCS3472 Color Light-to-Digital Converter with IR-Filter Datasheet. Plano, Texas.

[TF16] Tinkerforge GmbH. Tinkerforge.com. Abgerufen am 29. 05 2016 von http://www.tinkerforge.com/de

[TI07] Texas Instruments. (2007). TMP102 - Low Power Digital Temperatur Sensor With SMBus™/Two-Wire Serial Interface in SOT563 Datasheet. Dallas, Texas.

[TS19] Titov W, Schlegel T: Monitoring Road Surface Conditions for Bicycles: Using Mobile Device Sensor Data from Crowd Sourcing. In: Krömker H: HCI in Mobility, Transport, and Automotive Systems: First International Conference, MobiTAS 2019, Held as Part of the 21st HCI International Conference, HCII 2019 (Orlando, FL, USA, July 26-31, 2019) Proceedings. Cham: Springer, S. 340-356.

[TJT08] Thomas, T., Jaarsma, R., & Tutert, B. (07. 11 2008). Temporal variations of bicycle demand in the Netherlands: The influence of wheater on cycling. Transportation Research Board.

[TNH15] Taniguchi, Y., Nishii, K., & Hisamatsu, H. (2015). Evaluation of a Bicycle-Mounted Ultrasonic Distance Sensor for Monitoring Road Surface Condition. 7th International Conference in Computational Intelligence, Communciation Systems and Networks. Riga, Lettland: IEEE.

[XBA15] Xiaofeng, L., Bin, L., Aimin, J., Shixin, Q., Chaosheng, X., & Ning, X. (2015). A Bicycle-borne Sensor for Monitoring Air Pollution near Roadways. Changzhou, China: IEEE